

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



18/11-77

P6 - 10417

8-926

1423/2-77

Ц.Вылов

ПРЕЦИЗИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ГАММА-ЛУЧЕЙ
РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

1977

P6 - 10417

Ц.ВЫЛОВ

ПРЕЦИЗИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ГАММА-ЛУЧЕЙ
РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*Направлено на совещание по ядерной спектроскопии
и структуре атомного ядра. Ташкент, 1977.*

Вылов Ц.

P6 - 10417

Прецизионная спектрометрия гамма-лучей радиоактивных нуклидов с помощью полупроводниковых детекторов

Изложена методика прецизионной гамма-спектроскопии. Построен полный набор нормалей энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей радиоактивных нуклидов. Сводные данные таблиц являются результатом обработки более 3000 аппаратурных спектров.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Vylov Ts.

P6 - 10417

Precision Spectrometry of Gamma-Rays of
Radioactive Nucleides Using Semiconductor
Detectors

The technique of precision gamma-ray spectrometry has been described. A complete set of gamma-ray energies and relative intensity standards is given. The data tables are the result of the processing of more than 3000 gamma-ray spectra.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1977

© 1977 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

Методика измерения энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей с помощью полупроводниковых детекторов (ППД) основана на сравнении аппаратных спектров исследуемого и эталонного нуклидов, и на пути этих сравнений имеется много причин, значительно ухудшающих предельно достижимую точность^{/1-6/}. Следовательно, процесс сопоставления положения максимума спектральной линии (Р) и энергии (Е), а также площади спектральной линии (S) и интенсивности (I) должен быть последовательным с точки зрения учета данных эталонных нуклидов и четким относительно расчета погрешностей. С учетом того, что в настоящее время спектрометры на основе кремния и германия обладают характеристиками, близкими к предельно возможному, изменение данных об эталонных нуклидах приведет лишь к простым коррекциям результатов без повторения эксперимента.

Целью настоящей работы является систематическое изложение и обсуждение методики прецизионных измерений энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей^{/1-6/}. На основе проведенного анализа выбраны условия и модель расчета физических результатов при высококачественных измерениях. С помощью нормалей 3-го порядка (¹⁸²Ta и ¹⁹²Ir) и пяти калиброванных по активности образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСИ) построен полный набор нормалей энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки спектрометров с ППД. Очевидно, что такой подход позволит более полно и критически оценить полученные результаты и перспективы развития и применения столь важного метода исследования.

I. СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА^{/1/}

Блок-схема спектрометров и система их связи с ЭВМ для обработки экспериментальных данных показана на рис.1^{/1,4/}. В зависимости от условий физической задачи мы применяем различные комбинации детекторов, спектрометрических усилителей (ЛУ) и анализирующей аппаратуры. Вопросы оптимизации системы ППД-предусилитель (ПУ) изложены в^{/1/}. В ЛУ применяется дискретная система переключения коэффициентов усиления (КУ), что связано с простотой обращения во время эксперимента, а также с требованиями, возникающими при измерении характеристик гамма-лучей (нелинейность спектрометра, удобство при измерении $T_{1/2}$ и т.д.). Параметры применяемых ППД приведены в табл. I. Сравнение ширины спектральных линий на их полувысоте и абсолютных эффективностей некоторых из наших и самых распространенных типов спектрометров приведены на рис. 2.

II. ОБРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ^{/1,2/}

В обработке спектральной линии применяется модельный подход, т.е. строят математическую модель исследуемого спектра и определяют такие значения параметров модели, при которых она наиболее точно аппроксимирует аппаратурный (точнее, его часть) спектр (программа "КАТОК"^{/7/}):

$$N(K) = \frac{S}{\sqrt{2\pi}} \int_{K-1}^K \exp \left[-\left(\frac{K-P}{2} \right)^2 \right] dx + \sum_{i=1}^l a_i K^i \quad (I)$$

Здесь $N(K)$ - число импульсов в канале K ; S - площадь пика; P - положение максимума пика; σ^2 - дисперсия; полином l степени описывает фоновую подложку под пиком. Используемый в программе метод применим к вырожденным задачам и дает возможность определять число пиков на различных участках спектра^{/8/}. После окончания обработки на перфоленту (магнитную ленту) выводятся результаты ($P, \Delta P, S, \Delta S$ и σ) для последующей обработки.

Для правильного планирования эксперимента исследованы зависимости P и $\Delta S/S$ от параметров модели - рис. 3. Из этих результатов вытекает правильный выбор времени экспозиции (рис.3а), цена канала (рис.3б) и ППД (рис.3в). Нужно еще добавить, что в области $\sigma < 2,5$ устойчивость обработки сложных участков и даже одиночных пиков нарушается (рис.3б).

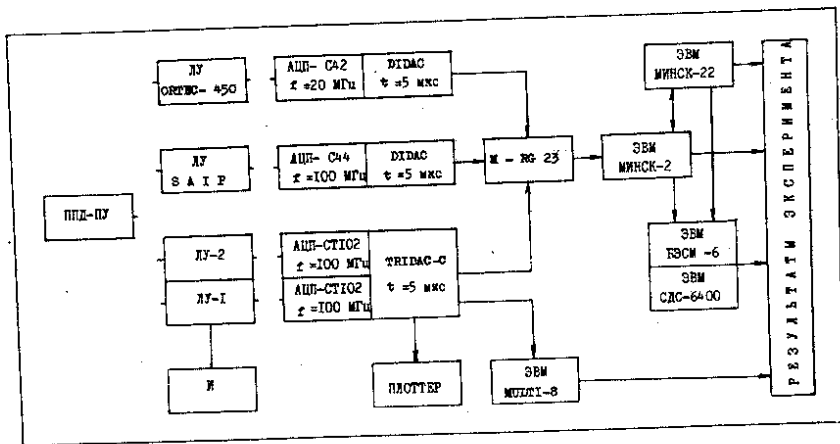


Рис. 1. Блок-схема спектрометров и система их связи с ЭВМ для обработки экспериментальных данных.

№	ДЕТЕКТОР	ПАРАМЕТРЫ И ТИП ПИД	ТОЛЩИНА ФУОРТИВНОГО ПОТО СЛОЯ	НАПРЯЖЕНИЕ СМЕРЗЕНИЯ	ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ДЛЯ В/КЭВ, мэВ/			ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРОМЕТРА	ИЗГОТОВИТЕЛЬ:
					5700 5,6 КЭВ	5700 122 КЭВ	6000 1,3 МЭВ		
1	СИ(LI)	80 мм ² X 4 мм ПЛАНАРНЫЙ	4 мм	1500 В	290 ЗВ	600 ЗВ	-	5-160 5-20-70-160	ЛЭИ - ОИЯИ
2	СИ	25 мм ² X 5 мм ПЛАНАРНЫЙ	5 мм	1200 В	150 ЗВ	500 ЗВ	-	14-279 14-60-279	ПРИНЦИПОН ГАММА-ТЕХИ
3	СИ(LX)	1,3 см ³ ПЛАНАРНЫЙ	8 мм	1500 В	-	600 ЗВ	1,6 КЭВ	14-600 14-80-300-600	ЛЭИ - ОИЯИ
4	СИ(LI)	200 мм ² X 5 мм ПЛАНАРНЫЙ	5 мм	1000 В	240 ЗВ	550 ЗВ	1,6 КЭВ	14-600 14-80-300-600	ОРИС
5	СИ	300 мм ² X 7 мм ПЛАНАРНЫЙ	7 мм	1500 В	250 ЗВ	550 ЗВ	-	14-600 14-80-300-600	ПРИНЦИПОН ГАММА-ТЕХИ
6	СИ(LI)	11 см ³ ПЛАНАРНЫЙ	12 мм	2500 В	-	1,3 КЭВ	2,2 КЭВ П/К=10/1	59-2750 59-250-700-2750	ЛЭИ - ОИЯИ
7	СИ(LI)	37 см ³ КОАКСИАЛЬНЫЙ ¹	15 мм	3000 В	-	1,5 КЭВ	2,1 КЭВ П/К=20/1	72-2750 72-390-1115-2750	ЛЭИ - ОИЯИ
8	СИ(LI)	38 см ³ КОАКСИАЛЬНЫЙ ¹	16 мм	3000 В	-	0,9 КЭВ	1,9 КЭВ П/К=25/1	59-2750	ЛЭИ - ОИЯИ
9	СИ(LI)	48 см ³ КОАКСИАЛЬНЫЙ ²	18 мм	2000 В	-	1,6 КЭВ	2,3 КЭВ П/К=26/1	82-2750 82-390-834-2750	ЛЭИ - ОИЯИ
10	СИ(LI)	50 см ³ КОАКСИАЛЬНЫЙ ¹	18 мм	3000 В	-	1,4 КЭВ	2,1 КЭВ П/К=35/1	120-2750 120-390-834-2750	ОРИС

Табл. 1. Параметры применяемых ПИД (коаксиальный¹ - ПИД с одним открытым переходом; коаксиальный² - ПИД с двумя открытыми переходами).

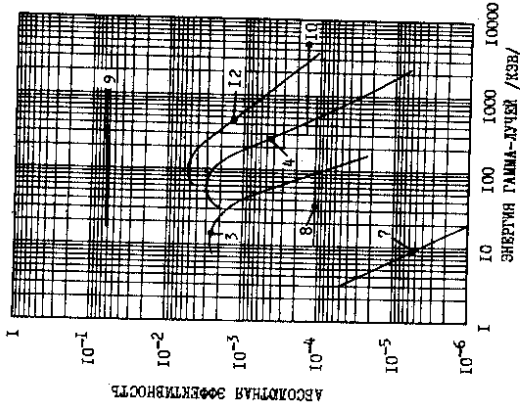
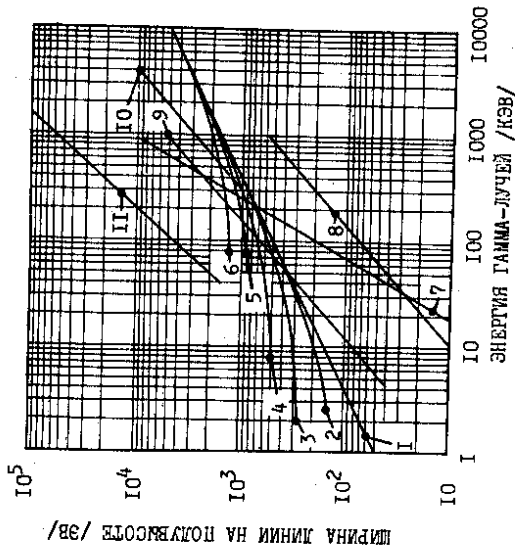


Рис. 2. Сравнение ширины спектральных линий на их полувысоте и абсолютных эффективностей для различных спектрометров в зависимости от энергии регистрируемого излучения (в скобках даны значения телесных углов): 1- предельное разрешение для Ge при факторе Фано $F=0,13$; 2-Ge, $25 \text{ мм}^2 \times 5 \text{ мм}$; 3-Si(Li), $30 \text{ мм}^2 \times 4 \text{ мм}$ (1%); 4-Ge(Li), $1,3 \text{ см}^3$ (1,5%); 5-Ge(Li), 38 см^3 ; 6-Ge(Li), 11 см^3 (1%); 7- кристалл-дифракционный типа Демонда; 8- магнитный железный типа Даныша, $\Delta r/p=0,04\%$ (0,01%); 9- безжелезный торидальный, $\Delta r/p=0,4\%$ (7%); 10- магнитный железный $2 \text{ х л}\sqrt{2}$, $\Delta r/p=0,2\%$ (0,015%); II-NoJ(II); 12-Ge(Li), 37 см^3 (1%).

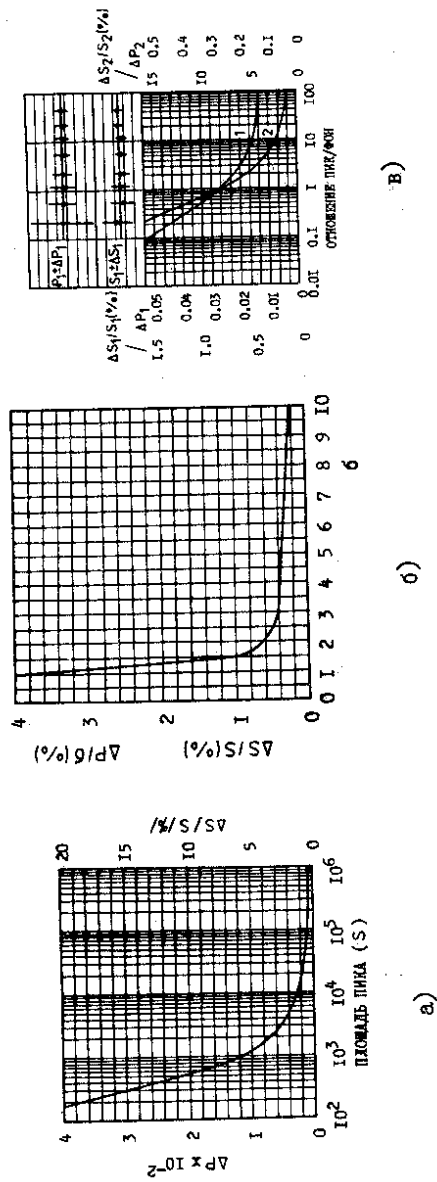


Рис. 3. Зависимость ΔP и $\Delta S/S$ от параметров модели программы "НАТОК": а) $\sigma=3.3$; $P/\phi = 100$; б) $S = 1.6 \times 10^5$; в) $S_1 = 1.2 \times 10^5$, $S_2 = 1.1 \times 10^4$.

III. ЭФФЕКТЫ, ИСКАЖАЮЩИЕ ФОРМУ АППАРАТУРНОГО СПЕКТРА^{1/2/}

При измерении спектров гамма-лучей с помощью ППД можно выделить две группы эффектов, которые искажают форму аппаратурного спектра: эффекты, связанные с процессом преобразования энергии – импульс заряда в ППД (источник, ППД и их взаимное расположение); эффекты, связанные с процессом анализа импульса от ППД электронной аппаратурой (стабильность, загрузочные характеристики, форма спектральной линии) – табл. 2^{1/2/}. Для иллюстрации вклада некоторых эффектов на рис. 4 показан спектр гамма-лучей ¹³⁹Ce, измеренный с помощью 200 мм² x 5 мм Ge(Li)-детектора. Источник нанесен на медной подложке толщиной 500 мкм.

С точки зрения последующего изложения интерес представляет анализ зависимости нелинейности спектрометра от способа регулировки КУ. В работе ^{1/2/} показано, что нелинейность зависит от величины постоянной формирования τ . Такой же эффект наблюдается и при регулировке КУ с изменением переходной характеристики формирующего усилителя. В случае регулировки КУ с помощью частотно-независимого аттенюатора такая зависимость отсутствует.

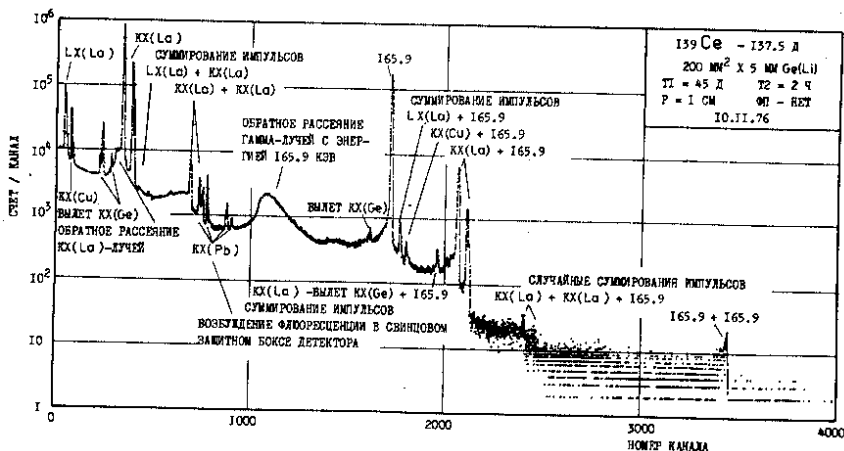


Рис. 4. Спектр гамма-лучей ¹³⁹Ce, измеренный с помощью 200 мм² x 5 мм Ge(Li)-детектора.

Табл. 2. Эффекты, искажающие форму аппаратурного спектра.

I. ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОЦЕССОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ - ИМПУЛЬС ЗАРЯДА В ППД.

A. РАДИОАКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК.

1. Обратное рассеяние от подложки источника.
2. Регистрация сопровождающих излучений: альфа, бета и внутреннее тормозное излучение.
3. Рассеяние в собственной толщине источника.
4. Возбуждение характеристического излучения в подложке и собственной толщине источника.

Б. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР.

1. Выбор ППД.
2. Образование пар в ППД.
3. Вылет собственного характеристического излучения ППД.
4. Рассеяние в толщине входного окна ППД.
5. Зависимость формы спектральной линии от эффективности собирания заряда.

В. ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С ВЗАИМНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ИСТОЧНИКА И ППД.

1. Рассеяние во входном окне вакуумной камеры, в окружающих ППД материалах и в фальцах поглощения.
2. Возбуждение характеристического излучения в окружающих ППД и источник материалах.
3. Регистрация аннигиляционных квантов, возникающих при взаимодействии выскоэнергетических гамма-лучей с образованием пар в окружающих ППД материалах.
4. Обратное рассеяние в материалах, находящихся за расположенным ППД.
5. Внешнее тормозное излучение.
6. Зависимость положения максимума спектральной линии от геометрии измерения.
7. Естественный радиоактивный фон.
8. Суммирование импульсов.

II. АППАРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.

A. СТАБИЛЬНОСТЬ СПЕКТРОМЕТРОВ.

1. Временная стабильность.
2. Температурная стабильность.
3. Загрузочные характеристики.

Б. СИММЕТРИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ.

В. НЕЛИНЕЙНОСТЬ СПЕКТРОМЕТРА.

IV. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИЙ И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ГАММА-ЛУЧЕЙ

Методика предполагает использование шести нормалей для энергетической калибровки. При этом необходимо предварительное исследование нелинейности и эффективности в заранее выбранных условиях и их аппроксимация аналитическими выражениями.

I. Нелинейность спектрометра^{/3,4,5/}

Нелинейность исследуется в предположении, что два произвольных ("опорных") пика разных энергий лежат на прямой, коэффициенты V_1 и V_2 которой находят из уравнений:

$$E = V_1 + V_2 P \quad V_1 = \frac{E_1 P_2 - E_2 P_1}{P_2 - P_1} \quad V_2 = \frac{E_1 - E_2}{P_1 - P_2} \quad (2)$$

Нетрудно показать, что от выбора разности $|P_2 - P_1|$ зависит точность построения нелинейности, а следовательно, и погрешность измерения энергий (обычно $|P_2 - P_1| > 3500$). Затем с помощью (2) рассчитывают положения максимумов пиков с известной энергией и строятся зависимость $\delta_j = P_j - P_j^{\text{расч.}}$ от номера канала P . Далее значения δ_j аппроксимируют полиномом:

$$\delta_j = \sum_{i=1}^M A_i P_j^{i-1}, \quad (3)$$

где $M=2+5$. Число участков для аппроксимации ≤ 5 . Оптимальное значение M и область аппроксимации выбирают по минимуму величины

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\delta_j - \delta_j^{\text{эксп.}}) = \bar{\Delta}, \quad (4)$$

где n - число экспериментальных точек. Обычно $\bar{\Delta} < 0,05$ канала, причем величина $\bar{\Delta}$ зависит от качества спектрометра, аккуратности экспериментатора и внутренней согласованности применяемого набора нормалей энергий. Программа построения нелинейности спектрометра и аппроксимации экспериментальных данных описана в работе ^{/3/}.

Пример построения нелинейности спектрометра с Ge(Li)-детектором и ее аппроксимации полиномом (3) приведен на рис. 5а^{/3,5/}.

2. Эффективность спектрометра^{/3,4,5/}

При исследовании эффективности спектрометра возможны два подхода: с применением калиброванных по активности источников (набор ОСТИ) или с применением данных об относительных интенсивностях нуклидов со сложной схемой распада^{/6/}. Полученные экспериментальные значения эффективности (ϵ_j) аппроксимируют полиномом:

$$\ln \epsilon_j = \sum_{i=1}^M c_i (\ln E_j)^{i-1}, \quad (5)$$

где $M=2+5$. Число участков для аппроксимации ≤ 5 , причем процедура аналогична описанной для случая нелинейности. Как правило, на выбранных участках $\leq 2\%$.

Пример исследования эффективности спектрометра с 38 см^3 Ge(Li)- детектором приведен на рис. 56^{/3,5/}.

3. Обработка результатов однократного измерения^{/3,5/}

Экспериментальный спектр обрабатывают с помощью программы "КАТОК". После учета нелинейности (коррекция $P_j \rightarrow P'_j$), по МНК и с помощью данных для 6 нормалей энергий проводится расчет коэффициентов прямой:

$$E_j = B_1 + B_2 P'_j. \quad (6)$$

В качестве весов используются величины $[(\Delta E_j)^2 + (B_2 \Delta P_j)^2]^{-1}$. Погрешность энергии рассчитывают по формуле:

$$\Delta E_j = \left[\Delta B_1^2 + \Delta B_2^2 P_j^2 + r P_j + B_2^2 \Delta P_j^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Здесь три первых члена определяются коридором ошибок при проведении калибровочной прямой ($r P_j$ - корреляционный член), а четвертый - погрешностью определения положения максимума пика.

Относительные интенсивности гамма-лучей и их погрешности вычисляют по формулам:

$$I_j = \frac{S_j}{\epsilon_j} \frac{I_H}{S_H / \epsilon_H} \quad \Delta I_j = I_j \left[\left(\frac{\Delta S_j}{S_j} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S_H}{S_H} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

где ϵ_j - эффективность спектрометра для гамма-лучей с энергией E_j ; I_H и S_H - интенсивность и площадь пика, выбранного в качестве нормировочного; S_j - площадь калибруемого пика.

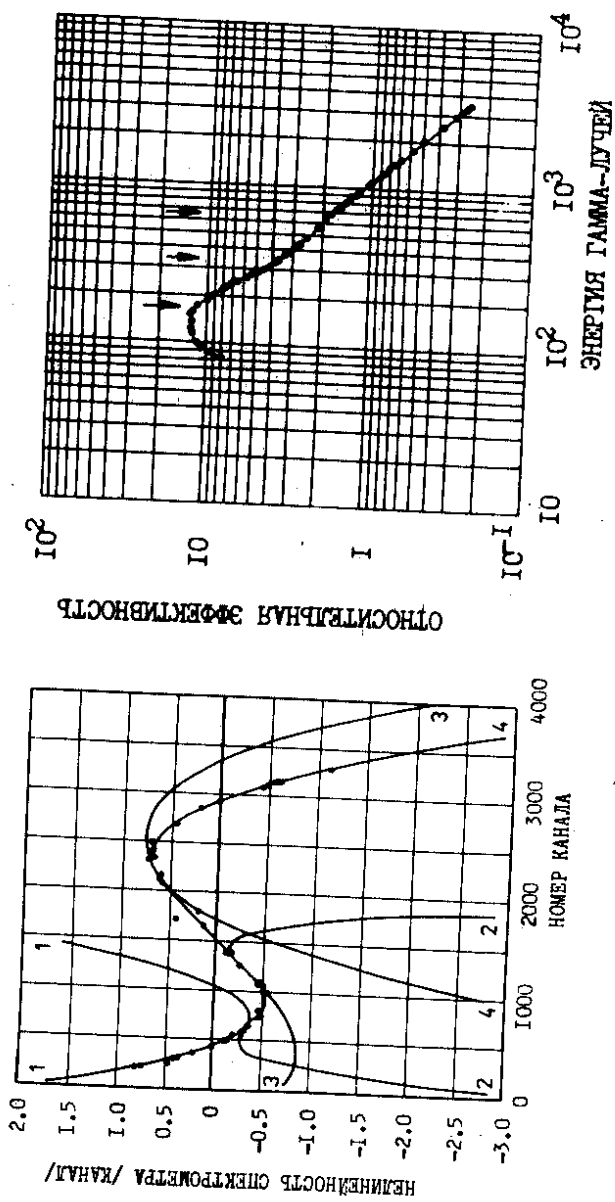


Рис. 5. Не линейность (а) и эффективность (б) спектрометра с Ge(Li) - детектором и результаты аппроксимации экспериментальных данных с помощью полиномов (3) и (5), соответственно.

Затем переходят к отбору полезной информации по следующим признакам/5/:

- а) Параметры режима измерения;
- б) Качество обработки спектральной линии с помощью ЭВМ;
- в) Вклад процесса образования пар в ПИД;
- г) Вклад дочерних или примесных нуклидов в искажение интенсивностей исследуемых гамма-переходов.

Предусмотрен также "ручной режим" отбора информации, с помощью которого отбрасывают переходы, обработанные многократно с различными начальными приближениями, а также возможные фоновые, аппаратные и примесные пики.

Программа организована таким образом, что различные критерии можно проверять многократно или вообще не применять. Данные первоначальной обработки, а затем скорректированные результаты записывают на магнитные ленты или перфорируют для последующей обработки.

4. Обработка результатов многократных измерений

Значения энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей рассчитывают по следующим формулам:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i (I/\Delta E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (I/\Delta E_i)^2} \quad \Delta E_1 = \left[a_1^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 \right]^{1/2}$$

$$\Delta E_2 = \left[a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n I_i (I/\Delta I_i)^2}{\sum_{i=1}^n (I/\Delta I_i)^2} \quad \Delta I_1 = \left[\beta_1^2 + \beta_3^2 \right]^{1/2}$$

$$\Delta I_2 = \left[\beta_2^2 + \beta_3^2 \right]^{1/2}$$

$$a_1^2 = \frac{I}{\sum_{i=1}^n (I/\Delta E_i)^2} \quad a_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (I/\Delta E_i)^2 (E - E_i)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (I/\Delta E_i)^2}$$

$$a_3^2 = \rho^2 E^2 \quad \left[\begin{array}{l} a_5^2 = I/3 \beta_2^2 \Delta^2 \\ a_5^2 = 0 \end{array} \right. \quad \beta_3^2 = x^2 I^2.$$

$$a_4^2 = \mu^2 E^2$$

Здесь n - число измерений; E - энергия, кэВ; a_3 - погрешность нормалей 3-го порядка в предположении $E(4II.8) = 4II,794 \pm 0,000$ кэВ; $\rho = 5 \times 10^{-6}$; a_4 - погрешность нормали второго порядка $\mu = 17 \times 10^{-6}$; a_5 - погрешность, связанная с аппроксимацией нелинейности для измерения на одном спектрометре (для разных спектрометров эта погрешность из систематической переходит в случайную, т.е. $a_5 = 0$); погрешности β_1 и β_2 рассчитывают аналогично a_1 и a_2 , соответственно. В качестве ΔE и ΔI выбирают погрешность, наибольшая из $\Delta E_1, \Delta E_2$ и $\Delta I_1, \Delta I_2$ соответственно.

5. Организация экспериментов по измерению спектров гамма-лучей радиоактивных нуклидов /5/

После настройки гамма-спектрометров и систематизации эффектов, искажающих форму аппаратного спектра, составляют план эксперимента по схеме, приведенной на рис.6 и детально рассмотренной в работе /5/.

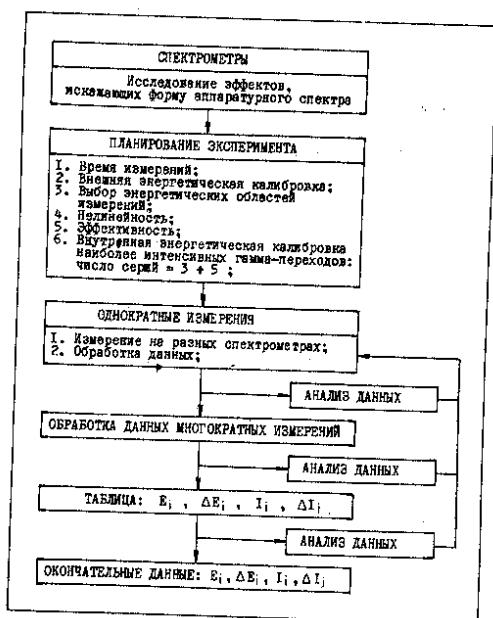


Рис. 6. Схема организации экспериментов по измерению спектров гамма-лучей радиоактивных нуклидов с помощью ПИД.

У. НОРМАЛИ ЭНЕРГИЙ ГАММА-ЛУЧЕЙ^{4/4/}

В качестве нормалей третьего порядка использованы энергии (табл.3) гамма-лучей ^{182}Tl и ^{192}Ir /10/, измеренные с помощью кристалл-дифракционного спектрометра в предположении

$$E(4\text{II}, 8 - ^{198}\text{Hg}) = 4\text{II}, 794 \pm 0,007 \text{ кэВ.} \quad (10)$$

Для сравнения в этой же таблице приведены энергии, рекомендованные другими авторами, а также данные контрольного эксперимента, полученные с помощью построенного нами набора нормалей энергий. Данные табл.3 являются поводом для многих размышлений, связанных с выбором нормалей энергий. Ряд расхождений говорит о наличии ошибок в экспериментах с кристалл-дифракционными спектрометрами (см. колонки 1, 2 и 3). Надо помнить, что ΔE включает погрешность нормали второго порядка (^{198}Hg) и это значение может создавать иллюзию сходимости энергий в пределах погрешности. Особое внимание следует уделить переходу с энергией 588 кэВ (^{192}Ir) - приведенное значение в /10/ (колонка 1) можно рассматривать как промах.

Табл. 3. Энергии гамма-лучей ^{182}Tl и ^{192}Ir : $\Delta E'$ - относительная погрешность ($\alpha_4 = 0$); ΔE - полная погрешность ($\alpha_4 = 17 \times 10^{-6} E$). Литературные источники: 1 - /10/; 2 - /11/; 3 - /12/; 4 - /16/.

НУКЛИД	1			2			3			4			5		
	E	ΔE	$\Delta E'$	E	ΔE	$\Delta E'$	E	ΔE	$\Delta E'$	E	ΔE	$\Delta E'$	E	ΔE	$\Delta E'$
^{182}Tl	31.7370	0.0004	0.0007	31.736	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	42.7143	0.0006	0.0009	42.715	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	65.7219	0.0006	0.0013	65.722	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	67.7496	0.0006	0.0013	-	-	67.750	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-
	84.6802	0.0008	0.0016	84.680	0.003	84.680	0.002	-	-	-	-	-	84.681	0.003	0.002
	100.1067	0.0009	0.0019	100.103	0.002	100.105	0.001	-	-	-	-	-	100.105	0.002	0.002
	113.6677	0.0011	0.0022	113.673	0.003	113.673	0.002	-	-	-	-	-	113.672	0.008	0.008
	116.4172	0.0011	0.0023	116.416	0.004	116.418	0.002	-	-	-	-	-	116.413	0.003	0.003
	152.4298	0.0013	0.0029	152.431	0.003	152.434	0.002	-	-	-	-	-	152.427	0.003	0.003
	156.3819	0.0014	0.0030	156.391	0.004	156.387	0.002	-	-	-	-	-	156.380	0.005	0.005
	179.3895	0.0016	0.0034	179.395	0.005	179.393	0.003	-	-	-	-	-	179.388	0.003	0.003
	198.3478	0.0017	0.0038	198.361	0.008	198.356	0.002	-	-	-	-	-	198.349	0.007	0.007
	222.1037	0.0019	0.0042	222.107	0.005	222.110	0.003	-	-	-	-	-	222.102	0.006	0.006
	229.3162	0.0035	0.0052	229.321	0.008	229.322	0.006	-	-	-	-	-	229.316	0.005	0.005
	264.0697	0.0022	0.0050	264.072	0.009	264.072	0.006	-	-	-	-	-	264.069	0.005	0.005
^{192}Ir	136.3400	0.0007	0.0024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	295.2483	0.0014	0.0052	295.242	0.009	295.242	0.006	-	-	295.249	0.004	-	295.246	0.005	0.005
	308.4464	0.0014	0.0054	308.430	0.010	308.445	0.007	-	-	308.444	0.005	-	308.445	0.006	0.006
	316.4977	0.0014	0.0056	316.487	0.010	316.497	0.007	-	-	316.496	0.005	-	316.495	0.006	0.006
	416.4501	0.0035	0.0079	-	-	416.450	0.008	-	-	-	-	-	416.454	0.014	0.014
	468.0546	0.0021	0.0082	468.059	0.014	468.062	0.010	-	-	-	-	-	468.056	0.009	0.009
	588.3562	0.0034	0.0106	588.367	0.017	588.372	0.012	-	-	588.366	0.008	-	588.372	0.012	0.012
	604.3942	0.0026	0.0106	604.396	0.017	604.401	0.012	-	-	604.393	0.008	-	604.394	0.012	0.012
	612.4460	0.0026	0.0106	612.446	0.017	612.450	0.013	-	-	612.445	0.008	-	612.446	0.013	0.013
	884.5037	0.0044	0.0156	-	-	884.523	0.018	-	-	884.514	0.012	-	-	-	-

Нормали энергий выше 600 кэВ создавались с использованием значений энергий переходов, полученных суммированием конкурирующих каскадных переходов для нуклидов с хорошо исследованными схемами распада: ^{95m}Te , ^{134}Cs , ^{110m}Ag , ^{144}Ce и ^{56}Co . Энергия отдачи ядра учитывалась по формуле:

$$E_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 \frac{m}{M(A,Z)} mc^2. \quad (\text{II})$$

Поскольку число конкурирующих каскадов для нуклидов с достаточно простыми спектрами и удобными в работе периодами полураспада ограничено, мы использовали также факт сохранения нелинейности спектрометра при изменении коэффициента усиления с помощью частотно независимого аттенуатора^{/2/}.

Процедура построения полного набора нормалей энергий гамма-лучей описана в /4/. Проведено более 800 серий измерений на различных детекторах, спектрометрических трактах и при разных коэффициентах усиления. При этом учитывались эффекты, искажающие форму аппаратного спектра^{/2/}. Результаты экспериментов приведены в табл. 4. Следуя^{/II/}, мы приводим порядки нормалей. Нормали каждого следующего порядка получены в непосредственном сравнении с нормалью предыдущих. Знак + указывает на то, что значение энергии получено путем суммирования энергий конкурирующих каскадных переходов.

Проверка надежности нормалей энергий до 600 кэВ проводилась путем решения обратной задачи - измерения энергий гамма-лучей ^{182}Tl и ^{192}Ir с помощью данных табл. 4. Результаты трех серий измерений приведены в табл. 2 (колонка 5). Они говорят о хорошей сходимости наших данных с рекомендованными. Проверка надежности в более широкой области проводилась с помощью конкурирующих прямых и каскадных переходов в пределах α_1 и α_2 . Данные о 45 каскадных переходах для II нуклидов приведены в табл. 5. Из приведенных результатов 71% (32 каскада) совпадают в пределах σ , 96% (43 каскада) - в пределах 2σ , 98% (44 каскада) - в пределах 3σ . Этот факт можно толковать как подтверждение правильности модели расчета погрешностей.

Табл. 4. Нормали энергий гамма-лучей. Обозначения: $\Phi I = a_1$; $\Phi 2 = a_2$; Q - порядок нормали; q - число серий измерений.

НУКЛИД	Q	q	E	ΦI	$\Phi 2$	ΔE
182Th	3	1	31.7370	-	-	0.0007
182Th	3	1	42.7143	-	-	0.0009
182Th	3	1	59.538	0.002	0.003	0.003
182Th	3	1	63.1182	-	-	0.0011
182Th	3	1	65.7219	-	-	0.0013
182Th	3	1	67.7496	-	-	0.0015
170Th	3	1	84.2517	-	-	0.0016
182Th	3	1	84.6832	-	-	-
160Th	4	6	86.790	0.001	0.001	0.001
109Gd	4	14	88.032	0.001	0.003	0.003
75Se	4	6	96.734	0.002	0.004	0.004
153Gd	4	12	97.432	0.001	0.002	0.003
182Th	3	1	100.1067	-	-	0.0019
182Th	3	1	103.181	0.001	0.002	0.002
169Yb	3	9	109.784	0.001	0.004	0.004
182Th	3	1	113.6677	-	-	0.0022
182Th	3	1	116.4172	-	-	0.0023
169Yb	3	9	116.137	0.001	0.004	0.005
75Se	4	12	121.157	0.001	0.002	0.003
152Eu	4	14	121.782	0.001	0.002	0.003
57Co	4	15	122.050	0.001	0.001	0.002
169Yb	3	9	130.595	0.001	0.004	0.004
144Ce	4	13	133.516	0.001	0.003	0.003
75Se	4	13	136.000	0.001	0.003	0.003
57Co	4	13	136.475	0.001	0.004	0.005
182Th	3	1	152.4298	-	-	0.0029
182Th	3	1	156.3819	-	-	0.0030
139Ce	3	11	165.864	0.001	0.003	0.003
173Lu	3	9	177.206	0.001	0.003	0.004
169Yb	3	9	179.363	0.001	0.004	0.005
173Lu	3	9	179.3895	-	-	0.0034
182Th	3	1	197.026	0.003	0.004	0.005
160Th	4	4	197.946	0.001	0.002	0.003
169Yb	3	9	198.3478	-	-	0.0038
182Th	3	1	198.603	0.002	0.003	0.005
75Se	4	6	198.603	0.002	0.003	0.005
160Th	4	6	215.641	0.001	0.002	0.004

НУКЛИД	Q	q	E	ΦI	$\Phi 2$	ΔE
182Th	3	1	222.1037	-	-	0.0042
182Th	3	1	229.3162	-	-	0.0052
173Lu	3	9	233.603	0.002	0.003	0.006
152Eu	4	14	244.681	0.001	0.004	0.006
113Sn	4	15	255.137	0.007	0.006	0.008
169Yb	3	9	261.059	0.007	0.011	0.012
182Th	3	1	264.0711	-	-	0.0050
75Se	4	6	264.652	0.001	0.001	0.006
173Lu	3	9	272.111	0.001	0.002	0.006
133Ba	4	7	276.397	0.003	0.003	0.006
208Tl	4	7	279.189	0.003	0.003	0.006
169Yb	3	9	279.535	0.001	0.003	0.006
75Se	4	6	285.369	0.002	0.005	0.007
173Lu	3	9	295.9483	-	-	0.0052
192Ir	3	9	298.571	0.002	0.003	0.006
160Th	4	5	302.850	0.002	0.003	0.006
133Ba	4	7	303.908	0.004	0.006	0.010
75Se	4	6	307.790	0.003	0.006	0.007
169Yb	3	9	308.4464	-	-	0.0054
192Ir	3	9	316.4977	0.001	0.003	0.007
152Eu	4	14	324.267	0.002	0.003	0.007
133Ba	4	7	326.036	0.002	0.003	0.007
169Yb	3	9	326.036	0.004	0.006	0.016
133Ba	4	7	326.768	0.003	0.009	0.011
139Ce	3	11	339.831	0.003	0.009	0.011
113Sn	4	17	391.680	0.002	0.009	0.011
75Se	4	6	400.858	0.002	0.003	0.010
152Eu	4	14	411.084	0.006	0.007	0.010
192Ir	3	9	411.794	-	-	0.007
139Ce	3	11	416.4501	-	-	0.0079
152Eu	4	14	443.940	0.006	0.005	0.009
169Yb	3	9	446.902	0.004	0.013	0.016
110Ag	3	9	456.3546	-	-	0.0062
192Ir	3	9	468.5546	-	-	0.011
134Cs	3	11	468.5546	0.004	0.006	0.011
134Cs	3	11	569.322	0.003	0.003	0.012
207Bi	4	16	569.322	0.001	0.006	0.012
192Ir	3	9	588.5562	-	-	0.0106
192Ir	3	9	604.3942	-	-	0.0106

НУКЛИД	Q	q	E	ΦI	$\Phi 2$	ΔE
134Cs	5	11	604.707	0.001	0.007	0.014
192Ir	3	9	612.4460	-	-	0.0106
110Ag	4	9	620.383	0.005	0.007	0.021
173Lu	3	9	636.129	0.004	0.007	0.013
110Ag	4	9	657.744	0.002	0.006	0.014
137Cs	4	11	661.648	0.002	0.006	0.014
110Ag	4	9	677.613	0.002	0.006	0.015
110Ag	4	9	687.031	0.003	0.006	0.016
144Ce	4	10	696.492	0.004	0.010	0.016
110Ag	4	10	706.672	0.002	0.007	0.016
110Ag	4	9	744.271	0.003	0.012	0.019
110Ag	4	9	763.396	0.003	0.013	0.020
152Eu	4	7	778.918	0.003	0.009	0.017
134Cs	4	10	786.188	0.005	0.006	0.015
95Tc	4	10	795.856	0.002	0.009	0.018
134Cs	4	10	801.867	0.003	0.012	0.020
110Ag	4	9	818.028	0.004	0.019	0.025
95Tc	4	14	820.632	0.011	0.012	0.019
134Cs	4	10	834.868	0.002	0.004	0.015
95Tc	4	14	847.777	0.004	0.004	0.016
152Eu	4	5	867.383	0.006	0.006	0.016
192Ir	3	9	884.5037	-	-	0.0156
110Ag	4	9	884.695	0.002	0.004	0.016
88Y	4	11	898.048	0.004	0.014	0.023
152Eu	4	5	913.472	0.026	0.006	0.030
110Ag	4	9	937.507	0.003	0.004	0.017
152Eu	4	5	964.070	0.003	0.006	0.018
152Eu	4	5	1006.235	0.004	0.009	0.024
56Co	4	14	1037.841	0.003	0.003	0.024
152Eu	4	5	1066.895	0.004	0.009	0.021
56Co	4	14	1089.726	0.008	0.008	0.034
152Eu	4	5	1112.065	0.008	0.010	0.024
65Zn	4	12	1115.655	0.004	0.004	0.020
182Th	3	1	1121.290	0.004	0.004	0.020
60Co	4	8	1173.236	0.006	0.010	0.023

НУКЛИД	Q	q	E	ΦI	$\Phi 2$	ΔE
56Co	6	11	1175.095	0.006	0.025	0.031
182Th	3	1	1189.084	0.004	0.004	0.021
182Th	3	1	1212.896	0.006	0.010	0.024
182Th	3	1	1221.391	0.004	0.005	0.022
182Th	3	1	1230.988	0.004	0.005	0.023
56Co	6	11	1238.271	0.003	0.009	0.023
182Th	3	1	1287.416	0.007	0.015	0.027
182Th	3	1	1273.731	0.010	0.014	0.027
22Th	4	11	1274.531	0.004	0.006	0.023
182Th	3	1	1289.119	0.007	0.012	0.027
182Th	3	1	1299.103	0.009	0.013	0.026
60Co	6	11	1332.465	0.006	0.007	0.025
56Co	6	11	1360.209	0.007	0.007	0.029
134Cs	4	10	1365.177	0.007	0.002	0.027
110Ag	4	9	1394.279	0.005	0.010	0.026
152Eu	4	7	1407.374	0.006	0.009	0.026
110Ag	4	9	1475.778	0.009	0.006	0.028
144Ce	4	10	1489.132	0.009	0.017	0.031
110Ag	4	9	1508.028	0.009	0.006	0.028
110Ag	4	9	1562.303	0.007	0.003	0.034
207Bi	4	16	1770.253	0.006	0.013	0.034
56Co	6	11	1771.247	0.006	0.023	0.039
56Co	6	11	1810.768	0.018	0.052	0.061
56Co	6	11	1836.074	0.008	0.008	0.034
88Y	4	13	1963.760	0.014	0.009	0.048
56Co	6	13	2015.296	0.019	0.027	0.045
56Co	6	13	2034.772	0.017	0.020	0.041
56Co	6	13	2113.154	0.030	0.006	0.052
144Ce	4	7	2186.607	0.013	0.009	0.041
56Co	6	7	2212.959	0.036	0.033	0.101
56Co	6	7	2598.435	0.011	0.010	0.068
56Co	6	7	3123.587	0.013	0.011	0.068
56Co	6	7	3201.987	0.019	0.019	0.060
56Co	6	7	3253.414	0.016	0.006	0.060
56Co	6	7	3273.000	0.020	0.022	0.062
56Co	6	7	3451.173	0.024	0.043	0.075

Табл. 5. Энергии гамма-лучей, полученные с помощью каскадных переходов и измеренные с помощью нормалей энергий из табл.4. Обозначения: E(I) и E(2)- каскадные гамма-лучи; E(K)- рас- четное значение прямого гамма-перехода; E- принятое значение прямого гамма-перехода.

ИЗЛОД	E(I)	φ(I)	E(2)	φ(2)	E(K)	φ(K)	E(П)	φ(П)	E(K) - E(П)	
56 Co	1238.271	0.008	1360.209	0.017	2598.450	0.019	2598.429	0.013	-0.021	0.023
	1238.271	0.008	2016.196	0.027	3253.423	0.028	3253.410	0.019	-0.013	0.024
	1238.271	0.008	2034.769	0.033	3272.995	0.033	3273.000	0.022	+0.005	0.040
75 Se	96.734	0.004	303.908	0.008	400.642	0.004	400.646	0.006	+0.004	0.007
	121.177	0.002	279.035	0.003	400.652	0.003	400.646	0.006	-0.006	0.007
	136.000	0.003	264.852	0.001	400.652	0.003	400.646	0.006	-0.006	0.007
99m Tc	204.119	0.003	582.068	0.005	786.184	0.006	786.194	0.007	+0.010	0.009
	204.119	0.003	616.497	0.019	820.640	0.013	820.640	0.013	0.000	0.018
110mAg	657.744	0.005	813.028	0.019	1475.777	0.020	1475.781	0.010	+0.004	0.022
	620.353	0.017	884.695	0.004	1506.024	0.017	1506.028	0.011	+0.004	0.022
	687.001	0.012	813.028	0.019	1506.043	0.023	1506.028	0.011	-0.015	0.025
	677.613	0.006	884.695	0.004	1562.393	0.008	1562.302	0.020	+0.026	0.022
	744.271	0.012	813.028	0.019	1562.392	0.029	1562.302	0.023	+0.017	0.030
	620.353	0.017	763.936	0.013	1384.285	0.021	1384.274	0.007	-0.011	0.022
	677.613	0.006	706.672	0.007	1384.280	0.009	1384.274	0.007	-0.006	0.011
446.802	0.013	937.507	0.004	1384.305	0.014	1384.274	0.007	-0.031	0.016	
134Cs	475.350	0.006	563.231	0.006	1038.580	0.008	1038.608	0.013	+0.028	0.015
	563.231	0.006	604.707	0.008	1167.937	0.010	1167.946	0.014	+0.009	0.017
	563.231	0.006	795.856	0.009	1365.177	0.011	1365.180	0.011	+0.003	0.016
563.231	0.006	801.943	0.016	1365.173	0.017	1365.180	0.011	+0.007	0.020	
140 La	328.763	0.004	487.012	0.010	815.773	0.011	815.770	0.015	-0.003	0.019
152 Eu	121.782	0.002	964.070	0.006	1085.851	0.007	1085.835	0.009	-0.016	0.012
	244.691	0.004	867.383	0.006	1112.073	0.007	1112.065	0.010	-0.008	0.012
	443.940	0.005	964.070	0.006	1408.008	0.008	1407.974	0.009	-0.034	0.012
	244.691	0.004	1212.895	0.010	1457.592	0.011	1457.590	0.034	+0.002	0.036
367.768	0.014	411.084	0.007	778.850	0.016	778.914	0.009	+0.064	0.019	
169 Yb	109.784	0.004	197.948	0.002	307.732	0.005	307.721	0.006	-0.011	0.008
	130.525	0.004	177.208	0.003	307.733	0.005	307.721	0.006	-0.012	0.008
171 Lu	72.382	0.006	667.357	0.010	739.738	0.012	739.747	0.018	+0.009	0.022
	72.382	0.006	780.656	0.022	853.038	0.023	853.033	0.018	-0.005	0.029
173 Lu	78.651	0.006	100.719	0.006	179.370	0.008	179.363	0.004	-0.007	0.009
	100.719	0.003	171.402	0.003	272.120	0.007	272.111	0.002	-0.009	0.007
	171.402	0.003	179.363	0.004	350.764	0.005	350.750	0.005	-0.014	0.007
	100.719	0.006	286.369	0.006	456.771	0.006	456.769	0.013	-0.002	0.014
	286.369	0.005	350.750	0.005	557.488	0.014	557.485	0.016	-0.003	0.021
	456.769	0.013	179.363	0.004	636.120	0.007	636.129	0.007	+0.009	0.010
	557.485	0.016	78.651	0.006	636.136	0.017	636.129	0.007	-0.003	0.016
	100.106	0.002	1189.034	0.004	1289.139	0.005	1289.119	0.014	-0.020	0.015
100.106	0.002	1167.306	0.022	1257.410	0.022	1257.416	0.015	+0.006	0.027	
229.316	0.005	828.023	0.042	1157.338	0.043	1157.308	0.022	-0.030	0.046	
229.316	0.005	1001.705	0.006	1231.018	0.008	1230.988	0.007	-0.030	0.011	
84.681	0.003	1189.034	0.004	1273.714	0.006	1273.711	0.014	-0.003	0.007	
116.413	0.003	1157.308	0.022	1273.716	0.022	1273.711	0.014	-0.005	0.026	
152.427	0.003	1121.290	0.004	1273.717	0.005	1273.711	0.014	-0.006	0.015	

Сравнение полученного нами полного набора нормалей энергий с приведенным в работе ^{/12/} иллюстрирует рис. 7. Как видно, с ростом энергии наблюдается систематическая расхожимсть, доходящая до 100 эВ. На этом же рисунке приведены и данные о гамма-лучах ⁵⁶Со, предложенные в ^{/13/}. Обратим внимание на тот факт, что эти значения совпадают с энергиями, получающимися с помощью пиков ДВ без учета вклада кинематических процессов в электрическом поле детектора при регистрации пары электрон-позитрон ^{/4/}. Особый интерес представляет сравнение полученных нами результатов с нормальями 3-го порядка, измеренными на магнитном безжелезном бета-спектрометре ^{/14/}:

НУКЛИД	НАСТОЯЩАЯ РАБОТА		РАБОТА ^{/14/}	
	Е	ΔЕ	Е	ΔЕ
⁶⁰ Со	1173.236	0.023	1173.226	0.040
⁶⁰ Со	1332.485	0.025	1332.483	0.046
²⁴ Na	1368.656	0.036	1368.526	0.044
²⁴ Na	2753.989	0.056	2753.920	0.120

Как видно, значения энергий гамма-лучей ⁶⁰Со согласуются отлично. Беспокойство вызывает значение энергии перехода 1368 кэВ (²⁴Na), но мы считаем, что расхожимсть может быть связана только с какой-нибудь ошибкой в ^{/14/}.

Значения некоторых нормалей энергий, рекомендованные разными авторами, сравниваются в табл. 6.

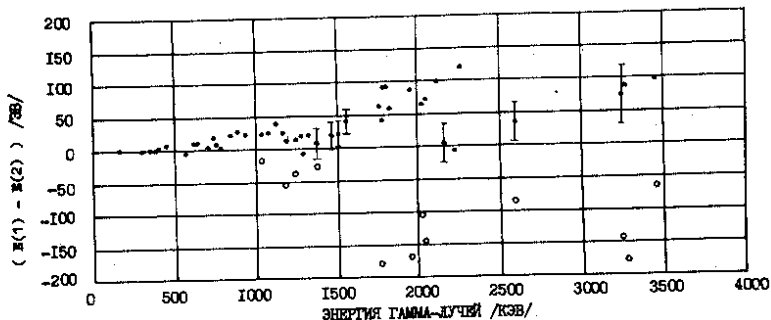


Рис. 7. Разность значений нормалей энергий гамма-лучей, рекомендованных в настоящей работе (E(1)) и в ^{/4/} (E(2)).

Табл. 6. Нормали энергий гамма-лучей, рекомендованные разными авторами.

НУКЛИД	1		2		3		4	
	E	ΔE	E	ΔE	E	ΔE	E	ΔE
109Cd	88.032	0.003	88.035	0.006	88.037	0.005	88.032	0.002
153Gd	97.432	0.003	97.429	0.003	97.432	0.003	-	-
153Gd	103.181	0.002	103.179	0.004	103.180	0.002	-	-
152Eu	121.782	0.003	121.780	0.004	-	-	-	-
57Co	122.060	0.002	-	-	122.063	0.004	-	-
57Co	136.475	0.005	-	-	136.473	0.004	-	-
139Ce	165.854	0.005	-	-	165.857	0.007	165.853	0.007
160Tb	215.641	0.004	-	-	215.641	0.004	-	-
203Hg	279.189	0.006	279.190	0.009	279.188	0.006	279.190	0.006
160Tb	298.571	0.006	-	-	298.572	0.006	-	-
152Eu	344.267	0.007	344.267	0.010	-	-	-	-
113Sn	391.688	0.011	-	-	391.688	0.010	-	-
207Bi	569.683	0.012	-	-	569.689	0.013	-	-
134Cs	604.707	0.014	604.748	0.030	-	-	-	-
137Cs	661.648	0.014	661.633	0.012	-	-	-	-
110mAg	763.936	0.020	-	-	661.638	0.019	-	-
54Mn	834.858	0.015	-	-	763.928	0.019	-	-
88Y	898.048	0.023	-	-	834.827	0.021	-	-
207Bi	1063.660	0.019	-	-	898.021	0.019	-	-
65Zn	1115.555	0.020	-	-	1063.635	0.024	-	-
60Co	1173.236	0.023	1173.263	0.040	1115.518	0.025	1115.39	0.10
22Na	1274.531	0.023	-	-	1173.208	0.025	1173.22	0.08
60Co	1332.485	0.025	1332.524	0.046	1274.511	0.028	-	-
144Ce	1489.132	0.031	-	-	1332.464	0.028	1332.52	0.10
207Bi	1770.253	0.034	-	-	1489.124	0.032	-	-
88Y	1836.074	0.034	-	-	1770.188	0.037	-	-
144Ce	2185.607	0.041	-	-	1836.014	0.037	-	-
56Co	2598.435	0.047	-	-	2185.608	0.046	-	-
56Co	3253.414	0.060	-	-	2598.400	0.053	-	-
56Co	3451.173	0.075	-	-	3253.341	0.065	-	-
					3451.064	0.069	-	-

1. Настоящая работа.
2. Б.С.Джелепов. Методы разработки сложных схем распада. D & F "Наука", Л., 1974, с. 22.
3. R.L.Heath. Gamma-Ray Spectrum Catalogue. ANCR-10000-2, 1974.
4. J.J.Reidy. "The Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy", edd. W.D. Hamilton, N-H PC, 1975, p.839.

У1. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАММА-ЛУЧЕЙ РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СПЕКТРОМЕТРОВ.

Для исследования эффективности спектрометров использовались пять различных наборов образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСТИ): один, изготовленный специально, имел препараты с активностью 10^6 расп./с; четыре, полученные из В/О "Изотоп", содержали препараты с активностью 10^5 расп./с. Три набора были аттестованы по активности с более высокой точностью во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева. Толщина полиэтиленовых пленок, между которыми находился активный слой источников, составляла (11 ± 3) мг/см². Радиоактивные источники, погрешность измерения их активности (ΔA) и выход гамма-лучей на 100 распадов приведены в табл.7. Там же приведены минимальные погрешности для эффективностей, которые можно получить при различных значениях ΔA . Величины $\Delta A = 1,5\%$ относятся к стандартному набору ОСТИ для 66% доверительной вероятности.

Измерения проводились на различных ППД и с учетом эффектов, искажающих форму аппаратурного спектра. Экспериментальные значения эффективности для четырех спектрометров приведены в табл. 8. Особо следует отметить трудности, связанные с выбором области аппроксимации. В основном они обусловлены сложным процессом регистрации гамма-лучей с помощью Ge(Li)-детекторов в области от 100 до 400 кэВ, когда идет сильная конкуренция между фотоэффектом и процессом многократного рассеяния в чувствительном объеме ППД. Трудности усугубляются еще тем, что в этой энергетической области нет достаточного количества калиброванных по активности источников. Это замечание относится также и к энергетической области 35-120 кэВ. В результате анализа различных вариантов аппроксимация экспериментальных значений эффективности спектрометров велась в областях, приведенных в табл.1.

Поиск возможных систематических ошибок в методике эксперимента проводился путем сравнения относительных интенсивностей гамма-лучей ряда нуклидов, измеренных на различных ППД. Проведено по 3 серии измерений каждого источника на каждом детекторе. Обработка данных велась по следующим формулам:

$$v\% = \frac{I(n) - I(m)}{I(n)} \times 100 \quad (12)$$

$$v\% = \frac{\Delta I(n) + \Delta I(m)}{I(n)} \times 100$$

$$I(N) = \sum w_i I_i \quad \Delta I(N) = (\sum w_i)^{-1}$$

Здесь $w_i = (\Delta I_i)^{-2}$ - вес i -го измерения; $N=n$ - число измерений на всех детекторах; $N=m$ - число измерений на данном детекторе; $I(n)$ и $I(m)$ - относительные интенсивности, полученные с помощью всех или только данного детектора, соответственно. Результаты расчета для двух детекторов иллюстрируются рис. 8. Как видно, максимальные отклонения доходят до $(3 \pm 1)\%$. Считая, что распределение отклонений равномерно от 0 до 3%, можно предположить (/II/ - стр. 154), что систематическая компонента среднеквадратической погрешности равна $\chi = 0,6 \times v_{\text{макс.}} = 1,8\%$. Напомним, что величина χ для стандартного набора ОСТИ равна 1,5% (табл. 7).

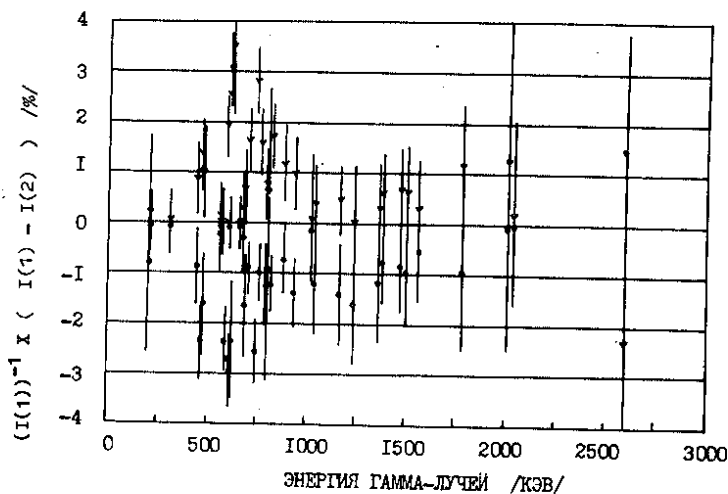


Рис. 8. Разность значений относительных интенсивностей для каждого детектора $I(2)$ и всех детекторов $I(1)$. Обозначения:
 • - $37 \text{ см}^3 \text{ Ge(Li)}$; ∇ - $11 \text{ см}^3 \text{ Ge(Li)}$.

Табл. 7. Радиоактивные источники: погрешность измерения активности (A%), выход гамма-лучей на 100 распадов и минимальные значения погрешности, которые можно получить при измерении эффективности спектрометра. Обозначения:

$$\Delta \epsilon_1 \% = \Delta I / I$$

$$\Delta \epsilon_2 \% = \left[(\Delta I / I)^2 + (\Delta A)^2 \right]^{1/2}$$

$$\Delta \epsilon_3 \% = \left[(\Delta I / I)^2 + (\Delta A = 1.5\%)^2 \right]^{1/2}$$

НУКЛИД	A-PA	T _{1/2}	A%	E	I	ΔI	Δε ₁	Δε ₂	Δε ₃
241Am	I	432.9(8) Г	I	59.54	35.9	0.6	1.7	1.9	2.3
109Cd	2	453.2(18) Д	2.5	22.1 КХ	83.00	3.00	3.6	4.4	-
				25.0 КХ	17.81	0.84	3.6	4.4	-
				88.03	3.79	0.07	1.8	3.1	-
57Co	I	269.8(4) Д	I	6.5 КХ	55.3	1.5	2.7	2.9	3.1
				14.4 I	9.5	0.2	2.1	2.3	2.6
				122.06	85.6	0.4	0.5	1.1	1.6
				136.47	10.75	0.30	2.8	3.0	3.2
139Ce	I	137.2(4) Д	I	33.4 КХ	62.53	0.57	3.8	3.9	4.1
				37.8 КХ	15.13	0.14	3.8	3.9	4.1
				168.85	80.35	0.08	0.1	1.0	1.5
203Hg	I	46.76(8) Д	1.5	10.3 LX	5.63	0.08	1.4	2.1	2.1
				72.9 КХ	9.77	0.50	5.1	5.3	5.3
				82.5 КХ	2.73	0.20	7.3	7.5	7.5
				279.19	81.55	0.16	0.2	1.5	1.5
113Sn	I	115.2(8) Д	1.5	3.3 LX	13.5	0.1	0.7	1.7	1.7
				24.7 КХ	96.6	0.3	0.3	1.5	1.5
				255.12	1.9	0.1	5.3	5.5	5.5
				391.69	64.4	0.3	0.5	1.6	1.6
137Cs	I	30.18(10) Г	I	4.5 LX	1.25	0.01	0.8	1.3	1.7
				32.1 КХ	5.57	0.18	3.2	3.3	3.5
				36.5 КХ	1.34	0.06	3.7	3.9	4.0
				661.65	85.1	0.5	0.6	1.2	1.6
54Mn	I	312.5(3) Д	0.5	5.5 КХ	25.0	0.2	0.8	0.9	1.7
				834.86	100	-	-	0.5	1.5
88Y	I	107.4(8) Д	1.5	14.4 КХ	63.40	0.32	0.5	1.6	1.6
				898.01	91.40	0.07	0.1	1.5	1.5
				1836.07	99.40	0.07	0.1	1.5	1.5
65Zn	I	245.7(11) Д	I	8.1 КХ	35.2	0.3	0.9	1.3	1.7
				1115.56	50.6	0.4	0.8	1.3	1.7
60Co	I	5.275(5) Г	0.5	1173.24	99.74	0.06	0.1	0.5	1.5
				1332.49	99.85	0.03	0.1	0.5	1.5
22Na	I	2.602(5) Г	I	1274.53	99.95	0.02	0.1	1.0	1.5
24Na	3;4	15.030(3) Ч	-	1368.60	100	-	-	-	-
				2753.97	99.85	0.02	0.02	-	-

1. И. Виллов, Л.А. Виллова и др., Препринт ОИЯИ, Р6-9073, Дубна, 1975.

2. R.J. Gehrke and R.A. Loken, Nucl. Instr. and Meth., 97 (1971) 219.

3. M.J. Martin and P.H. Blichert-Toft, Nucl. Data Tables, A8 (1970) N 1-2.

4. J.F. Emeri, S.A. Reinsol and E.L. Wyatt, Nucl. Sci. and Energ., 48 (1972) 319

Табл. 8. Экспериментальные значения эффективности, их аппроксимация полиномом (5), разность экспериментальных и расчетных значений эффективности для спектрометров.

В/кЭВ/ М	ИУКВ/Д	60 см ² X 4 мм Si(Li)		I.3 см ³ Ge(Li)		II см ³ Ge(Li)		37 см ³ Ge(Li)		
		ε (ЭКСП)	ε (РАСЧ)	Δ %	ε (ЭКСП)	ε (РАСЧ)	Δ %	ε (ЭКСП)	ε (РАСЧ)	Δ %
5.5	54мВ	2.453(-3)	2.522(-3)	-2.8	5.329(-4)	5.343(-4)	0.3	580	580	0
5.5	57мВ	4.405(-3)	4.454(-3)	-1.1	7.172(-4)	7.376(-4)	2.8	394	394	0
10.3	203мВ	4.405(-3)	4.454(-3)	-1.1	7.172(-4)	7.376(-4)	2.8	156	156	0
14.4	57мВ	5.079(-3)	5.135(-3)	-1.1	6.438(-4)	6.642(-4)	3.1	450	450	0
22.7	88мВ	5.164(-3)	5.174(-3)	0.6	6.574(-4)	6.584(-4)	0.1	350	350	0
24.7	103мВ	3.751(-3)	3.618(-3)	3.5	7.972(-4)	7.972(-4)	0	220	220	0
25.0	103мВ	2.441(-3)	2.684(-3)	-9.0	9.210(-4)	9.210(-4)	0	120	120	0
32.1	137мВ	2.658(-3)	2.489(-3)	4.5	8.574(-4)	8.574(-4)	0	62	62	0
37.9	137мВ	2.658(-3)	2.489(-3)	4.5	8.574(-4)	8.574(-4)	0	56	56	0
55.5	241мВ	5.740(-3)	5.751(-3)	-0.2	1.071(-3)	1.068(-3)	0.3	568	568	0
72.5	241мВ	2.658(-3)	2.809(-3)	-5.5	1.372(-3)	1.372(-3)	0	120	120	0
82.0	241мВ	1.849(-4)	1.883(-4)	1.8	9.727(-4)	9.727(-4)	0	120	120	0
126.0	57мВ	6.212(-5)	6.202(-5)	0.5	2.510(-3)	2.510(-3)	0	623	623	0
136.0	57мВ	4.435(-5)	4.324(-5)	2.2	2.510(-3)	2.510(-3)	0	133	133	0
166.0	138мВ	2.421(-5)	2.548(-5)	-5.2	3.572(-3)	3.572(-3)	0	133	133	0
203.0	138мВ	4.420(-6)	4.396(-6)	0.5	4.171(-3)	4.171(-3)	0	133	133	0
273.0	138мВ	4.420(-6)	4.396(-6)	0.5	4.171(-3)	4.171(-3)	0	133	133	0
391.0	54мВ	6.641(-5)	6.641(-5)	0	5.267(-3)	5.267(-3)	0	623	623	0
661.0	54мВ	2.421(-5)	2.548(-5)	-5.2	1.271(-3)	1.271(-3)	0	133	133	0
1173.0	662мВ	4.420(-6)	4.396(-6)	0.5	6.720(-6)	6.720(-6)	0	133	133	0
1774.0	662мВ	4.420(-6)	4.396(-6)	0.5	6.720(-6)	6.720(-6)	0	133	133	0
2573.0	662мВ	4.420(-6)	4.396(-6)	0.5	6.720(-6)	6.720(-6)	0	133	133	0
3797.0	24мВ	4.420(-6)	4.396(-6)	0.5	6.720(-6)	6.720(-6)	0	133	133	0

С помощью описанной методики измерены относительные интенсивности гамма-лучей многомерных источников, применяемых для калибровки спектрометров (табл.9). Согласованность этих данных с некоторыми наиболее часто применяющимися в экспериментальной практике^{/3/}, иллюстрирует рис.9. Наибольшая расхожимость наблюдается в области меньше 600 кэВ. Заметим, что любые изменения относительных интенсивностей легко перенести на принятый нами базис. В этом случае достаточно построить отношения:

$$K(E) = \left[I_1(E) - I_2(E) \right] \times (I_1(E))^{-1} \quad (13)$$

Далее, значения $K(E)$ аппроксимируют полиномом - это и есть коэффициент коррекции. Здесь $I_1(E)$ - наши данные; $I_2(E)$ - новые, уточненные результаты.

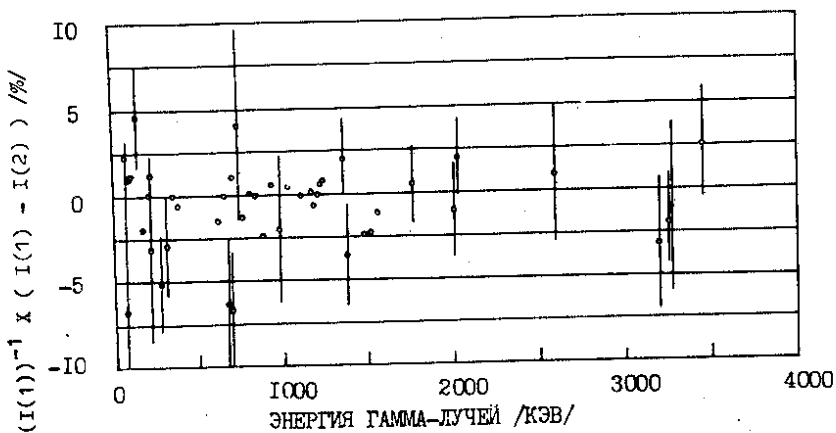


Рис. 9. Разность значений относительных интенсивностей гамма-лучей, полученных в настоящей работе $I(I)$ и приведенных в ^{/3/}. Точки относятся к распаду ¹⁵²Eu, ⁷⁵Se, ^{110m}Ag и ⁵⁶Co.

Табл. 9. Энергии и относительные интенсивности гамма-лучей радиоактивных нуклидов, примененных для калибровки гамма-спектрометров.

182Tc				152Eu				160Tb				56Co				
E	ΔE	I	ΔI	E	ΔE	I	ΔI	E	ΔE	I	ΔI	E	ΔE	I	ΔI	
11,737	0,001	1,990	0,006	121,782	0,003	92,912	2,300	18,001	0,364	263,082	0,245	0,144	0,085			
43,714	0,001	1,507	0,004	25,040	0,006	25,040	0,506	33,017	0,574	787,902	0,294	0,335	0,044			
59,52	KX	46,068	0,894	1,613	0,039	1,613	0,039	10,894	0,214	846,778	0,079	10,355	0,176			
65,722	KX	8,298	0,161	3,290	0,048	3,290	0,048	10,750	0,066	896,486	0,059	10,193	0,061			
67,250	KX	15,677	0,327	8,016	0,178	8,016	0,178	49,252	1,211	977,556	0,019	14,079	0,272			
84,681	0,001	2,788	0,165	10,993	0,269	10,993	0,269	19,173	0,351	1037,843	0,072	0,185	0,070			
100,105	0,003	40,590	0,835	1,400	0,055	1,400	0,055	1,359	0,053	1140,662	0,147	2,684	0,110			
110,406	0,014	5,024	0,238	1,377	0,087	1,377	0,087	337,346	0,035	1172,182	0,023	2,684	0,070			
116,443	0,003	7,114	0,366	2,477	0,081	2,477	0,081	225,780	0,032	1198,952	0,173	68,103	0,102			
126,150	0,003	1,511	0,082	1,057	0,081	1,057	0,081	892,383	0,032	1238,277	0,023	68,103	0,102			
129,388	0,003	8,637	0,411	40,306	1,028	40,306	1,028	100,000	0,853	1335,220	0,325	4,424	0,092			
138,349	0,007	4,035	0,182	87,383	0,018	87,383	0,018	966,168	0,033	1360,209	0,029	4,424	0,092			
222,102	0,005	21,507	0,381	13,177	1,206	13,177	1,206	1472,515	0,029	1442,515	0,310	15,797	0,338			
223,316	0,005	10,222	0,381	2,061	0,078	2,061	0,078	84,105	1,566	1492,515	0,029	15,797	0,338			
298,082	0,005	4,035	0,182	1089,726	0,034	1089,726	0,034	1,542	0,083	1610,749	0,059	0,258	0,036			
308,082	0,005	10,700	0,230	43,340	1,149	43,340	1,149	1102,601	0,041	1801,760	0,069	3,049	0,081			
1001,705	0,019	1,968	0,075	1117,985	0,040	1117,985	0,040	50,672	0,951	2015,196	0,041	8,058	0,161			
1113,547	0,024	2,228	0,075	1121,895	0,024	1121,895	0,024	1199,855	0,040	2034,772	0,041	8,058	0,161			
1121,290	0,020	100,000	1,905	5,223	1,744	5,223	1,744	1271,830	0,041	2112,154	0,052	0,386	0,035			
1157,493	0,030	2,837	0,134	67,227	0,076	67,227	0,076	523,859	0,101	2212,154	0,101	0,386	0,035			
1159,034	0,021	42,221	0,871	1528,135	0,104	1528,135	0,104	2658,436	0,169	2258,436	0,169	17,082	0,045			
1350,388	0,032	17,236	1,458	80,118	0,004	80,118	0,004	446,892	0,016	3003,587	0,068	17,082	0,045			
1350,388	0,032	34,209	0,930	697,744	0,014	697,744	0,014	620,373	0,016	3201,987	0,060	2,984	0,177			
1373,711	0,027	1,894	0,054	687,001	0,018	687,001	0,018	11,298	0,295	3253,414	0,060	2,984	0,177			
1289,119	0,027	3,858	0,080	706,672	0,019	706,672	0,019	6,844	0,186	3273,000	0,062	1,733	0,085			
1342,656	0,034	6,721	0,020	741,671	0,020	741,671	0,020	17,502	0,387	3547,961	0,085	0,900	0,031			
1342,656	0,034	6,721	0,020	884,656	0,012	884,656	0,012	77,024	0,179							
1373,710	0,043	0,205	0,028	917,507	0,017	917,507	0,017	35,443	0,274							
				1394,279	0,027	1394,279	0,027	26,648	0,513							
				1475,778	0,028	1475,778	0,028	4,372	0,086							
				1501,069	0,028	1501,069	0,028	14,372	0,282							
				1562,103	0,029	1562,103	0,029	1,296	0,025							

Табл. 9. Продолжение

E			I			AI			E			AE			I			AI		
17Lu																				
19,017	0,010	25,622	0,769	1,878	0,071	40,90	0,003	90,084	2,719	51,49	KX	192lr	235	0,025						
22,117	0,074	1,127	0,129	5,900	0,254	41,54	0,004	162,097	4,690	65,17	KX		3,599	0,074						
49,315	0,004	1,552	0,107	27,112	0,872	47,0	0,003	52,644	0,249	65,17	KX		4,827	0,092						
58,735	0,003	89,362	3,767	136,000	0,003	48,472	0,003	13,044	0,116	71,3	KX		0,994	0,016						
55,690	0,011	101,967	2,326	2,210	0,861	97,612	0,003	100,000	1,810	73,4	KX		0,370	0,016						
59,3	0,004	264,652	0,067	100,590	0,896	102,181	0,002	73,074	1,330	75,7	KX		0,208	0,012						
61,0	0,003	203,203	0,539	4,366	0,058	172,848	0,015	0,137	0,015	172,810	KX		0,503	0,013						
75,549	0,006	400,246	0,008	21,292	0,800					205,308	KX		0,325	0,012						
75,897	0,002	11,395	0,197							283,178	KX		3,322	0,070						
86,598	0,011	2,071	0,039	147,087	2,929	51,35	KX	192lr	5,806	299,946	KX		0,252	0,010						
91,499	0,007	0,851	0,018	26,907	1,634	58,4	KX		110,414	2,602	KX		32,152	0,812						
109,294	0,006	1,047	0,003	22,366	4,799	61,0	KX		23,199	2,149	KX		100,000	1,819						
122,942	0,030	0,080	0,008	136,600	4,799	78,651	KX		55,582	2,149	KX		0,032	0,021						
134,849	0,030	0,080	0,008	93,613	0,005	100,719	0,007	111,139	0,008	12,208	KX		0,072	0,018						
190,765	0,041	0,015	0,017	109,784	0,004	8,241	0,005	173,365	0,038	15,795	KX		0,129	0,018						
198,877	0,046	0,019	0,022	118,131	0,005	32,494	0,004	223,200	0,038	2,453	KX		0,072	0,018						
498,690	0,046	0,024	0,034	170,208	0,004	60,870	0,008	272,111	0,077	0,584	KX		0,072	0,018						
517,076	0,029	1,99	0,039	199,948	0,004	100,000	0,011	233,603	0,005	100,000	KX		0,072	0,018						
540,983	0,041	0,041	0,026	240,305	0,027	0,430	0,006	295,369	0,007	0,584	KX		0,072	0,018						
689,272	0,026	2,443	0,104	307,721	0,006	34,196	0,011	456,769	0,015	2,515	KX		0,072	0,018						
712,654	0,033	100,178	0,078					556,129	0,013	6,802	KX		0,072	0,018						
719,247	0,027	9,109	0,206								KX		0,072	0,018						
780,256	0,027	9,109	0,206								KX		0,072	0,018						
835,965	0,024	0,347	0,010								KX		0,072	0,018						
839,942	0,085	6,363	0,207								KX		0,072	0,018						
853,083	0,031	6,363	0,135								KX		0,072	0,018						
905,705	0,025	7,526	0,012								KX		0,072	0,018						
905,681	0,041	1,196	0,007								KX		0,072	0,018						
998,007	0,069	0,047	0,004								KX		0,072	0,018						
1094,985	0,053	0,058	0,003								KX		0,072	0,018						
1210,080	0,043	0,075	0,002								KX		0,072	0,018						
1242,559	0,043	0,048	0,002								KX		0,072	0,018						
1311,579	0,068	0,028	0,002								KX		0,072	0,018						
173Lu																				
40,90	0,003	90,084	2,719	51,49	KX	192lr	235	0,025												
41,54	0,004	162,097	4,690	65,17	KX															
47,0	0,003	52,644	0,249	65,17	KX															
48,472	0,003	13,044	0,116	71,3	KX															
97,612	0,003	100,000	1,810	73,4	KX															
102,181	0,002	73,074	1,330	75,7	KX															
172,848	0,015	0,137	0,015																	
192Ir																				
51,35	KX	192lr	5,806	205,308	KX															
58,4	KX	192lr	8,241	283,178	KX															
61,0	KX	192lr	11,139	299,946	KX															
78,651	0,007	55,582	2,149	308,445	KX															
100,719	0,007	12,208	0,068	316,420	KX															
111,139	0,008	15,795	0,038	374,868	KX															
173,365	0,005	2,453	0,109	416,454	KX															
223,200	0,038	2,453	0,077	420,345	KX															
233,603	0,005	100,000	0,061	468,056	KX															
272,111	0,077	0,584	0,032	489,029	KX															
295,369	0,007	0,584	0,032	588,572	KX															
320,746	0,006	0,584	0,032	593,420	KX															
456,769	0,015	1,647	0,026	604,394	KX															
556,129	0,013	2,515	0,100	612,446	KX															
556,129	0,013	6,802	0,173	884,159	KX															
194Au																				
72,81	KX	194Au	1,010	475,356	KX															
74,97	KX	194Au	1,408	563,251	KX															
84,5	KX	194Au	0,958	569,362	KX															
87,2	KX	194Au	1,334	704,867	KX															
87,2	0,012	100,000	0,031	801,967	KX															
569,683	0,012	100,000	0,031	1038,608	KX															
827,328	0,119	74,168	1,426	1167,946	KX															
1465,298	0,281	7,007	0,015	1365,177	KX															
1770,253	0,034	7,007	0,143																	
207Bi																				
19,543	KX	207Bi	1,010	475,356	KX															
31,262	KX	207Bi	1,408	563,251	KX															
31,262	KX	207Bi	1,408	563,251	KX															
81,847	KX	207Bi	0,958	704,867	KX															
87,2	KX	207Bi	1,334	801,967	KX															
100,000	0,012	100,000	0,031	1038,608	KX															
74,168	0,119	74,168	1,426	1167,946	KX															
7,007	0,015	7,007	0,015	1365,177	KX															

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложена методика прецизионных измерений энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей с помощью полупроводниковых детекторов. В предположении $E(4II,8 - {}^{198}\text{Hg}) = 4II.794 \pm 0,007$ кэВ и с использованием пяти калиброванных по активности наборов ОСГИ измерены энергии и относительные интенсивности гамма-лучей радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки спектрометров. Сводные данные таблиц являются результатом обработки более 3000 аппаратурных спектров.

Несколько замечаний:

а) Измерение энергий гамма-лучей в области меньше 100 кэВ связано со значительными трудностями при выборе нормалей энергии из-за искажения аппаратурного спектра характеристическим излучением эталонных нуклидов, а также вылета КХ-лучей в ППД. Для уменьшения этих искажений необходим тщательный анализ условий эксперимента.

б) В области 35-120 и 200-600 кэВ имеется сравнительно мало переходов, интенсивность которых можно было бы калибровать с высокой точностью. Имеется также и ряд трудностей при использовании ОСГИ в низкоэнергетической области^{/27/}. Поэтому полученные нами относительные интенсивности гамма-лучей мы надеемся исследовать путем детального анализа ряда сравнительно простых схем распада. Очевидно, эта задача связана с разработкой методики прецизионных измерений КВК. В этой связи приведенные нами данные об относительных интенсивностях гамма-лучей следует рассматривать как предварительные.

в) В настоящее время особое внимание уделяется значению энергии 4II,8 кэВ (${}^{198}\text{Hg}$). В частности, в работе^{/17/} приводится значение $4II,8007 \pm 0,0027$ кэВ, в работе^{/18/} - $4II,805 \pm 0,0015$. Поскольку набор нормалей энергии создавался с использованием конкурирующих каскадных переходов, процедура коррекции проста:

$$E_2 = E_1 \left(1 - \frac{E_1(4II.8) - E_2(4II.8)}{E_1(4II.8)} \right). \quad (14)$$

Здесь E_1 - значения энергий, полученные в предположении (10), E_2 - в предположении нового значения нормали второго порядка. В соответствии с этим изменяется и значение α_4 .

г) Как видно, сейчас нельзя провести корректное усреднение данных об энергиях и относительных интенсивностях гамма-лучей, ибо нет четких моделей расчета погрешностей и полных наборов нормалей, относительно которых выполнены сравнительные измерения. Тогда идея создания банков данных не имеет физического смысла. Выбранный нами подход, кажется, разрешает эти противоречия.

Разработанная методика будет использована в следующих задачах: исследование радиоактивного распада нуклидов, получаемых по программе "ЯСНАПП"/I⁹/; измерение КВК с помощью ППД; измерение энергий связи дейтрона из реакции ${}^1\text{H}(\text{n}\gamma){}^2\text{D}$; определение массы μ - и π -мезонов путем измерения энергий мезорентгеновских спектров.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ц.Вылов, И.Н.Егошин и др. ОИЯИ, Р6-9071, Дубна, 1975.
2. Ц.Вылов, Л.А.Вылова и др. ОИЯИ, Р6-9072, Дубна, 1975.
3. Ц.Вылов, Л.А.Вылова и др. ОИЯИ, Р6-9073, Дубна, 1975.
4. Ц.Вылов, В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р6-10414, Дубна, 1977.
5. Ц.Вылов, В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р6-10415, Дубна, 1977.
6. Ц.Вылов, В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р6-10416, Дубна, 1977.
7. В.Гаджиков. ПТЭ, 5 (1970) 82.
8. В.Гаджиков. ОИЯИ, Дубна, IO-5255, 1970
9. Н.Г.Клюкин, С.И.Орманджиев. ОИЯИ, I3-8629, Дубна, 1975. а
10. W.Beer and J.Kern. Nucl. Instr. and Meth., 117, 183 (1974).
11. Б.С.Джелепов. "Методы разработки сложных схем распада", "Наука", Л., 1974.
12. R.L.Heath. Gamma-Ray Spectrum Catalogue ANCR-1000-2, 1974.
13. J.Kern. Proc. Panel Meeting Charged-Particle-Induced Radiative Capture (IAEA, Vienna, 1972).
14. G.Murray, R.L.Graham and J.S.Geiger. Nucl.Phys., 63, 353(1965).
15. R.C.Greenwood and W.W.Black. Phys.Lett., 21 (1966) 702.
16. H.Inoue and Y.Yoshizawa. Nucl.Instr.and Meth., 108(1973)385.
17. A.L.Carter, M.S.Dixit et al. Phys.Rev.Lett., 37 (1976)1380.
18. C.L.Borchert. Annual Report, 1975, КРА-ИКР 10/76, p.43.
19. Р.Арльт, К.Я.Громов и др. ЭЧАЯ, т.5, вып.4(1974)843.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 февраля 1977 года.